

各種負帰還増幅回路の性能指数APIを用いた性能比較

著者	大川 典男, 一澤 春希
雑誌名	東京都立産業技術高等専門学校研究紀要
巻	15
ページ	64-71
発行年	2021-03
URL	http://id.nii.ac.jp/1282/00000261/



各種負帰還増幅回路の性能指数 API を用いた性能比較

Performance comparison of various negative-feedback amplifiers employing the performance index API

大川 典男¹⁾²⁾

Norio Ohkawa¹⁾²⁾

一澤 春希²⁾

Haruki Ichizawa²⁾

Abstract :

Due to the development of optical communication systems and wireless sensor network systems, not only wideband and high gain, but also low-power consumption circuits are required in the equalizing amplification section, which is a main element of the digital receivers that make up the system. In order to examine the configuration of the amplification circuits that can maximize these performances, a performance index API that can evaluate these three characteristic parameters collectively and expresses efficiency, is applied to the voltage-current type, current-voltage type, voltage-voltage type, and current-current type negative feedback amplification circuits. In order to find the maximum API value in a short time, a proposed method that can change the circuit parameters in multi-step while keeping the operating point fixed, applied it to calculate the API value of these negative-feedback amplification circuits. The maximum API value is obtained by voltage-current type, followed by current-voltage type, then current-current type, voltage-voltage type. Voltage-current type is about 1.3 times the maximum API value of voltage-voltage type, found to be that the main factor is due to bandwidth characteristics. Regarding the sensitivity characteristics of the API with respect to the power supply voltage V_{DD} , in any type of negative-feedback amplifier circuit, when V_{DD} fluctuations shifts to the negative side, the API drops more than when it shifts to the positive side. It is found that the permissible fluctuation range of V_{DD} when deviating to the negative side is half that when deviating to the positive side. In terms of the sensitivity characteristics of the API to the gate voltage V_{GG} , all types of negative feedback amplification circuits are sensitive to V_{GG} fluctuation, and the permissible fluctuation range is 5% to 6 %, which is the narrowest of all circuit parameters. It found that the suppression of V_{GG} fluctuation is the key to stabilizing circuit performance. From the above, it is clarified the performance of the voltage-current type, current-voltage type, voltage-voltage type, and current-current type negative-feedback amplification circuits and the API sensitivity characteristics to fluctuations of various circuit parameters.

Keywords :

Performance index, Negative-feedback amplifier, Low-power consumption, Fixed operating point multi-step analysis, Circuit parameter sensitivity analysis

1. まえがき

近年の光波長多重技術の進展による光ファイバ 1 本当たり 1000 波長の光伝送実験[1]や、空間分割多重技術による光ファイバ 1 本当たり 7 コアのマルチコアファイバでの伝送実験, 19 コアのマルチコアファイバの試作[2]など, さらに大容量化の研究開発が進められている. 光通信システムに適用される受信機は, 波長数×コア数に相当する数が必要となり, 高速化のみならず低消費電力化が重要な課題となっている.

さらに, IoT (Internet of Things) 用のネットワークデバイスは急速に数を増やしており, 最終的には毎年 1 兆

個を超えるセンサーネットワークデバイスを活用する時代が到来すると予想されている[3]. ワイヤレスセンサーネットワークを利用した様々なサービスの多くは屋外にセンサーが設置されることも多く, 管理コストの観点からバッテリーレスで動作可能なセンサー送受信器が強く要望されている. このため, 搬送波や環境電波からの給電で駆動できる極低消費電力化されたセンサー送受信機の実現が求められている.

これらの光通信システムやワイヤレスセンサーネットワークではデジタル信号が用いられ, それらに共通したデジタル受信機は一般的に 3R 機能 (等化増幅, タイミング抽出, 識別再生) を有している. アナログ動作をする等化増幅回路では帯域, 利得, 消費電力を一元的に評価する性能指標 API を提案し[4], 様々な増幅回路の性能評価を行ってきた. API を計算するためには, 回路パラメータを変更する毎に帯域, 利得, 消費電力を求める必要がある. 最も基本的な 1 段のソース接地増幅回路においても, ドレイン側に印加する電源電圧, ゲート-ソース間電圧, 負荷抵

¹ 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科電子情報工学コース

² 東京都立産業技術高等専門学校創造工学専攻電気電子工学コース

抗の 3 つの回路パラメータが存在する。回路の効率が最も高くなる API 最大値は、これらの回路パラメータをそれぞれ変更して求める必要があり、回路パラメータをどのように変更したら API 最大値に近づけるか、見通しがなければ膨大な数の API 計算が必要となる。従来の回路シミュレーションでは、一つの回路パラメータをマルチステップに変更し、他の回路パラメータは全て固定していたが、回路パラメータの変更とともにトランジスタの動作点がずれていくため、API 最大値となる回路パラメータ値を得るのに多大なシミュレーションの試行回数と時間を要した。今回、一つの回路パラメータをマルチステップに変更するとき、トランジスタの動作点が固定されるように、関連する他のパラメータも同時に変更する、動作点固定解析法と命名した回路シミュレーションの手法を考案した。これにより、ある動作点での API 最大値（動作点全体としては極大値であるため、以降 API 極大値と呼ぶ）を容易に求めることができる。動作点を変更し、同様なマルチステップ解析により、各動作点での API 極大値を求め、その中で最も大きな値から API 最大値を求めることができる。トランジスタの動作点に対する API 値のピークは 1 つだけ（そのピークが API 最大値となる）であることが判明しており[5]、着目した動作点の周りの動作点の API 極大値と比較し、着目した動作点の API 極大値が最も大きければ、それが動作点間隔の精度において、API 最大値であるということが出来る。動作点固定解析法により、従来と比較して短時間で API 最大値が求められるようになったので、これを用いて、広帯域化が期待できる各種負帰還増幅回路（電圧-電流形、電流-電圧形、電圧-電圧形、電流-電流形）の API 最大値を求め、各回路パラメータ変動に対する API 最大値の低下、いわゆる回路パラメータに対する API の感度解析を行い、各種負帰還増幅回路の API 特性を明らかにする。

2. 評価方法

各種負帰還増幅回路（電圧-電流形、電流-電圧形、電圧-電圧形、電流-電流形）の性能比較は、SPICE3 をベースとし、収束性に優れ、ゲート長 $0.18[\mu\text{m}]$ 、ゲート幅 $270[\mu\text{m}]$ の n-MOSFET デバイスモデル（T85S）に対応した SIMetrix による回路シミュレーションにて実施する。特性パラメータである 3dB 帯域幅、電圧利得、消費電力を回路シミュレーションにより求め、それらの特性パラメータを一元的に評価でき、効率を表す増幅回路の性能指標 API の最大値をそれぞれの負帰還増幅回路について求め、相互比較を行う。また、各回路パラメータ（電源電圧、ゲートソース間電圧、負荷抵抗、帰還抵抗、帰還インダクタ、ピーキング抵抗、ピーキングコンデンサなど）の変化に対する API 最大値の変動について評価を行う。

2.1 性能指標 API の概要

増幅回路の性能を効率という観点から評価するため、次式で定義される性能指標 API[4]を各種負帰還増幅回路の性能比較に適用する。

$$API = \frac{G \cdot B}{W} \quad [(\text{dB} \cdot \text{Hz}) / \text{W}] \quad (1)$$

ここで、 G は dB 表示した電圧利得 [dB]、 B は 3dB 帯域幅 [Hz]、 W は消費電力 [W] である。 G を dB 表示とすることにより、利得と損失の境界は 0 となる。 B 、 W は負とならない

ため、 G の正負、すなわち API の正負の判定により、増幅器と減衰器を明確に区別することが可能となる。API は単位消費電力当たりの利得帯域幅積、すなわち、増幅回路の効率を表した指標であると言える。これより API が正で大きい程、効率の高い増幅回路であると言える。増幅回路は回路パラメータにより特性パラメータが変化するので、SIMetrix のマルチステップ解析で回路パラメータを変化させて API が最も大きくなる値と、そのときの回路パラメータの求値を行う。

2.2 マルチステップ解析の手法

図 1 に一つの回路パラメータのみを変化させ、他の回路パラメータを固定する従来のマルチステップ解析を行った時の、黒丸で示す動作点の変動例を示す。この例では負荷抵抗 R_L のみを変化させており、電源電圧 V_{DD} は固定されているため、 R_L を大きくすると、固定されたゲートソース間電圧 V_{GS} 上にある動作点は左側（ドレインソース間電圧 V_{DS} が小さくなる方向）に移動していく。このため 1 回のマルチステップ解析を行い、その中で最も大きな API（API 極大値）が得られる回路パラメータが求まったとしても、 V_{DD} あるいは V_{GS} を別の値に固定して、同様な R_L によるマルチステップ解析を繰り返した場合、それぞれ、動作点が変わってしまい、API 最大値が得られる回路パラメータ値を予測し難く、メッシュ状に多くの解析点を取らなければ API が最大となる回路パラメータ値を求め難いという難点がある。

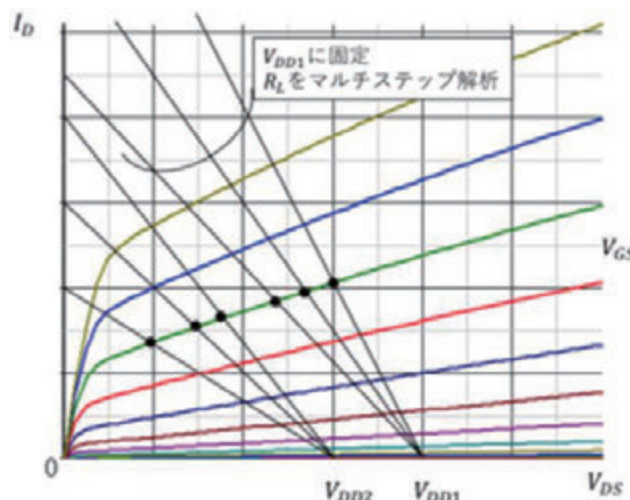


図 1 従来のマルチステップ解析の動作点

図 2 に動作点固定解析法と命名した、動作点を固定してマルチステップ解析を行ったときの動作点の例を示す。マルチステップ解析を行っても動作点は 1 点のみで変動することはない。これは動作点 Q の座標を (V_{DSQ}, I_{DQ}) としたとき、負荷直線は次式で表される。

$$I_D = -\frac{1}{R_L} V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_L} = -\frac{1}{R_L} (V_{DS} - V_{DSQ}) + I_{DQ} \quad (2)$$

これより R_L は、

$$R_L = \frac{(V_{DD} - V_{DSQ})}{I_{DQ}} \quad (3)$$

となり、電源電圧 V_{DD} と R_L を (3) 式で関連づけながらマ

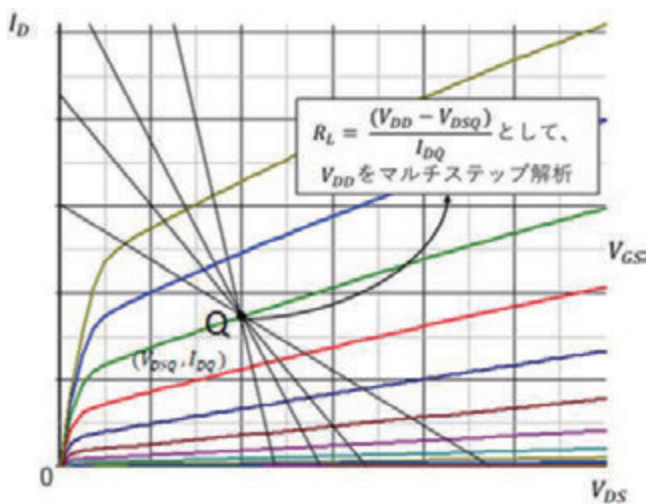


図2 提案方法によるマルチステップ解析の動作点

マルチステップ解析を行うことにより、動作点を固定したままで回路パラメータを変化させることができるからである。

動作点固定解析法を用いることにより、1回のマルチステップ解析でその動作点で最も大きなAPI値（API極大値）を求めることができる。動作点を逐次変えて同様に動作点固定解析法によりその動作点でのAPI極大値を求めていく。図3にAPI最大値が得られる動作点の決定例を示す。着目した動作点でのAPI極大値がその周り8点（ V_{DS} が同じで V_{GS} が大きい、または小さい場合、 V_{DS} が大きく V_{GS} が大きい、または同じ、または小さい場合、 V_{DS} が小さく V_{GS} が大きい、または同じ、または小さい場合）の中で最も大きい場合、トランジスタの動作点に対するAPI値のピークは1つだけであるため[5]、着目した動作点でのAPI極大値が、動作点間隔の精度においてAPI最大値であると言える。動作点間隔を狭めることにより、API最大値とその動作点の精度を向上させることが可能である。

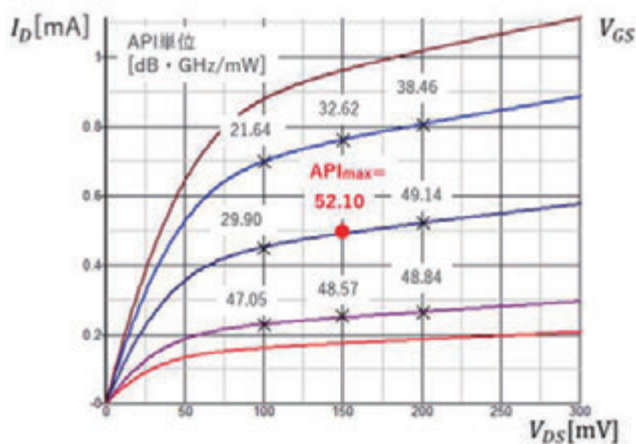


図3 API最大値が得られる動作点の決定方法（例）

3. 各種負帰還増幅回路の構成

負帰還増幅回路では、出力側から入力側へ帰還をかけるために、増幅部の出力信号を取り出す方法として、増幅部

出力と並列に帰還部を接続することにより電圧として取り出すか、または出力負荷と直列に帰還部を接続することにより電流として取り出すかの2つの方法がある。次に取り出した出力信号に比例した帰還信号を、帰還部を増幅部の入力側に直列に接続することにより電圧として入力側に戻すのか、帰還部を増幅部の入力側に並列に接続することにより電流として入力側に戻すのかの2つの方法がある。出力信号を取り出す方法と帰還信号を入力側に戻す方法の組み合わせにより、負帰還増幅回路は4種類に分類される。これらは負帰還であるため、取り出された出力信号と入力側の信号は逆相でなければならない。

今回検討した負帰還増幅回路は反転増幅であるソース接地回路を基本増幅回路としており、電圧-電圧形（並列帰還直列注入形）と電流-電流形（直列帰還並列注入形）では2段連続接続し、2段目の出力から1段目の入力側に負帰還をかけた。電圧-電流形（並列帰還並列注入形）と電流-電圧形（直列帰還直列注入形）は1段目の出力から1段目の入力側に負帰還をかけることができるが、電圧-電圧形や電流-電流形とも性能比較が行えるよう、1段毎に負帰還をかけ、それを2段連続接続した構成とした。トランジスタは全てT85S（ゲート長0.18[μ m]、ゲート幅270[μ m]のn-MOSFET)を適用し、回路シミュレーションによる性能比較を行った。SIMetrixによる回路シミュレーションにおいて、AC解析により周波数応答特性が得られるが、その特性から、API最適化支援プログラム[6]を適用することにより、利得 G と3dB帯域幅 B を自動的に抽出した。消費電力 W はDC解析からダイレクトに求めた。

3.1 電圧-電流形（並列帰還並列注入形）

図4に性能比較した、1段毎に負帰還をかけたものを2段連続接続した電圧-電流形負帰還増幅回路の構成を示す。濃い赤枠部分がソース接地回路を基本増幅部とした回路パラメータ、薄い青枠部分が帰還部の回路パラメータである。基本増幅部の回路パラメータは V_{DD} 、 R_L 、 V_{GS} の3種類、帰還部の回路パラメータは R_F 、 L_F の2種類とし、これら合計5種類の回路パラメータを最適化することによりAPI最大値を求めた。

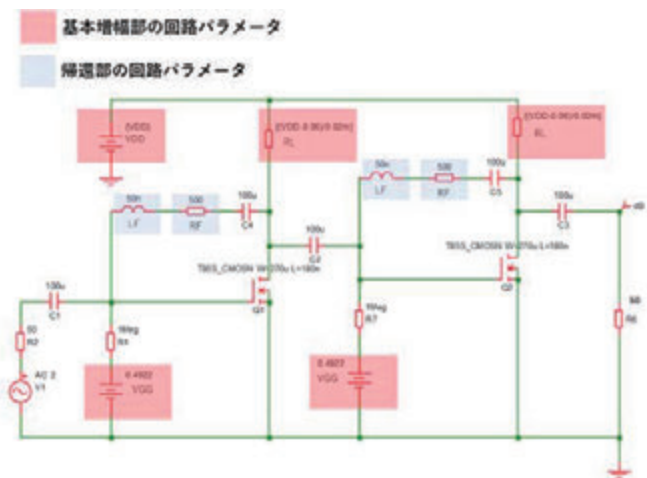


図4 検討した電圧-電流形負帰還増幅回路の構成

3.2 電流-電圧帰還形（直列帰還直列注入形）

図5に性能比較した、1段毎に負帰還をかけたものを2段連続接続した電流-電圧形負帰還増幅回路の構成を示す。

濃い赤枠部分がソース接地回路を基本増幅部とした回路パラメータ, 薄い青枠部分が帰還部の回路パラメータである. 基本増幅部の回路パラメータは V_{DD} , R_L , V_{GG} の 3 種類, 帰還部の回路パラメータは R_F , C_F の 2 種類とし, これら合計 5 種類の回路パラメータを最適化することにより API 最大値を求めた.

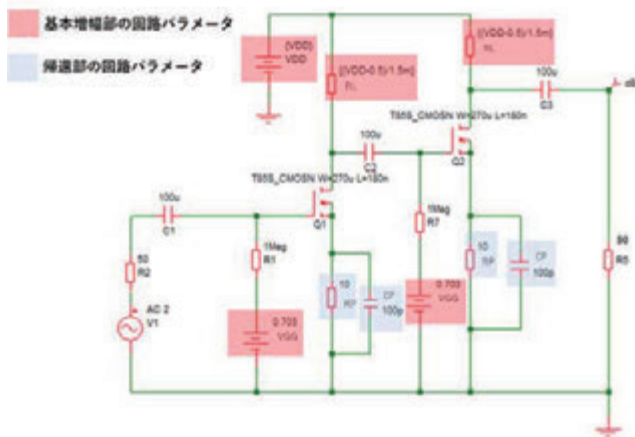


図5 検討した電流-電圧形帰還増幅回路の構成

3.3 電圧-電圧形（並列帰還直列注入形）

図6に性能比較した, 2段構成において2段目の出力から1段目の入力側に負帰還をかけた電圧-電圧形負帰還増幅回路の構成を示す. 濃い赤枠部分がソース接地回路を基本増幅部とした回路パラメータ, 薄い青枠部分が帰還部の回路パラメータである. 基本増幅部の回路パラメータは V_{DD} , R_L , V_{GG} の 3 種類, 帰還部の回路パラメータは R_F , L_F , R_F , C_F の 4 種類となり, これら合計 7 種類の回路パラメータを最適化することにより API 最大値を求めた.

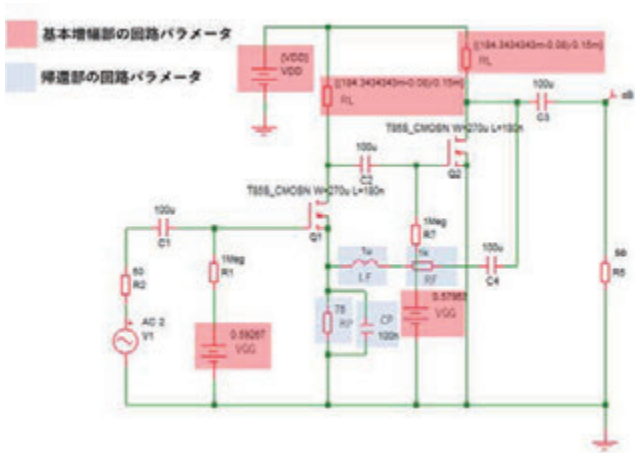


図6 検討した電圧-電圧形帰還増幅回路の構成

3.4 電流-電流形（直列帰還並列注入形）

図7に性能比較した, 2段構成において2段目の出力から1段目の入力側に負帰還をかけた電流-電流形負帰還増幅回路の構成を示す. 濃い赤枠部分がソース接地回路を基本増幅部とした回路パラメータ, 薄い青枠部分が帰還部の回路パラメータである. 基本増幅部の回路パラメータは V_{DD} , R_L , V_{GG1} , V_{GG2} の 4 種類となる. それぞれの段毎に V_{GG} の調整が必要な理由は, 2段目のみに挿入されている帰還

部の回路パラメータ R_F がバイアスに影響を及ぼしてしまうためである. 帰還部の回路パラメータは R_F , L_F , R_F , C_F の 4 種類となり, これら合計 8 種類の回路パラメータを最適化することにより API 最大値を求めた.

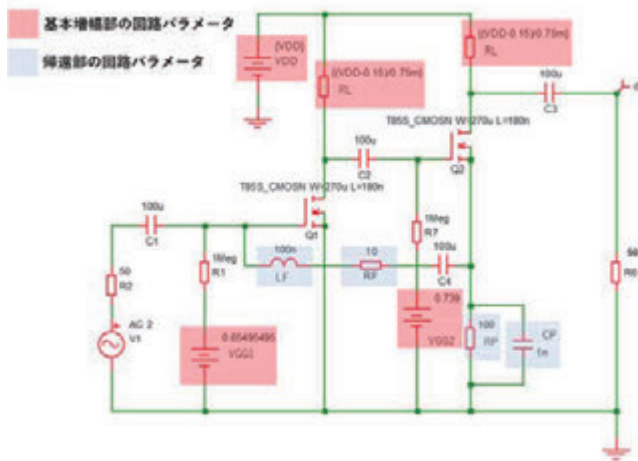


図7 検討した電流-電流形帰還増幅回路の構成

4. 検討結果と考察

以上により 4 種類の 2 段構成の負帰還増幅回路について, SIMetrix による回路シミュレーションを実施し, 特性比較を行った. トランジスタには, T85S と呼ばれるゲート長 $0.18 \mu\text{m}$, ゲート幅 $270 \mu\text{m}$ の nMOSFET を適用した.

4.1 各種負帰還増幅回路の API 最大値

各種負帰還増幅回路の電源電圧 V_{DD} の各値に対して API が最大となる値 (極大値) をプロットした API の V_{DD} 依存特性を図8に示す. 各種負帰還増幅回路ともに, V_{DD} を十分大きな値から減少させると API は緩やかな増加から急峻な増加へと変化してゆくが, トランジスタの静特性における飽和領域側から非飽和領域側に接近すると API は急激な減少に転じ, さらに V_{DD} を減少させると API は負となり, 減衰器となってしまふ. このため, V_{DD} による API 最大値が存在し, 電圧-電流形の $21.7[\text{dB} \cdot \text{GHz}/\text{mW}]$, 電流-電圧形の $20.3[\text{dB} \cdot \text{GHz}/\text{mW}]$, 電流-電流形の $16.9[\text{dB} \cdot \text{GHz}/\text{mW}]$, 電圧-電圧形の $16.4[\text{dB} \cdot \text{GHz}/\text{mW}]$ の順となった. 最も API 最大値が大きい電圧-電流形では, 最も小さい電圧-電圧形の約 1.3 倍の API 最大値が得られた.

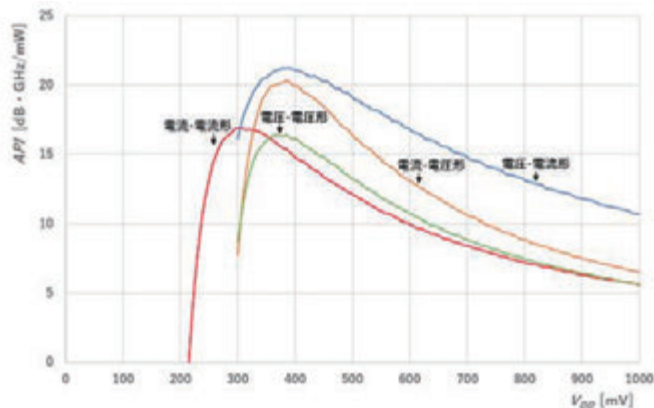


図8 各種負帰還増幅回路の API 極大値の V_{DD} 依存性

API 最大となる回路パラメータ V_{DD} の最適値近傍では V_{DD} に対する API 値の変動が大きいことがわかり、4.2 章から 4.8 章では、各回路パラメータに対する API の感度特性について検討し、考察を行った。

図 9 に API 最大値が得られた時の各種負帰還増幅回路の周波数応答特性を示す。図中の×印は 3dB 帯域幅を示す。図より、API が最も大きい、つまり最も効率の高い状態に回路パラメータを設定した場合、電圧-電流形が 3.0[GHz] と最も広帯域であることが明らかとなった。

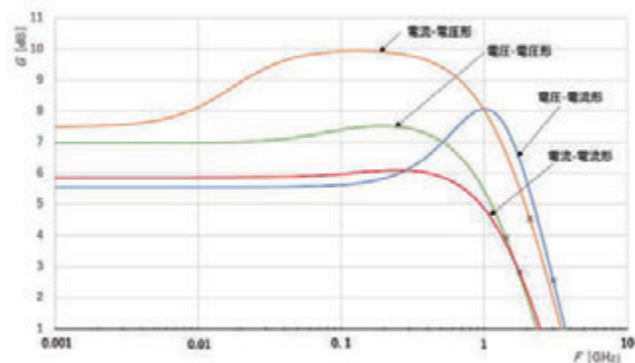


図 9 各種負帰還増幅回路の API 最大時の周波数応答特性

表 1 に各種負帰還増幅回路の API 最大値が得られたときの各特性パラメータ、各回路パラメータの最適値を示す。最も効率の高い電圧-電流形は、特に帯域特性に優れていることが、特性パラメータの値から明らかとなった。

表 1 API 最大時の各種負帰還増幅回路のパラメータ

API最大値と 各種パラメータ		負帰還増幅回路のタイプ			
		電流-電流	電流-電圧	電圧-電圧	電圧-電流
API [dB・GHz/mW]		16.9	20.3	16.4	21.7
特性	G [dB]	5.850	7.483	6.959	5.537
	B [GHz]	1.738	2.089	1.396	3.020
	W [mW]	0.6001	0.7697	0.5932	0.7697
増幅部	V_{DD} [mV]	300.0	384.8	370.7	384.8
	V_{GG1} [mV]	675.0	679.4	664.0	672.1
	V_{GG2} [mV]	686.3	679.4	655.6	672.1
	R_L [Ω]	288.0	364.8	438.4	369.8
	I_{DS} [mA]	1.000	1.000	0.800	1.000
	V_{DS} [V]	0.1200	0.2000	0.2000	0.1500
	R_F [k Ω]	1.000		0.500	1.000
帰還部	L_F [μ H]	1.000		1.000	0.200
	R_P [Ω]	10.00	10.00	10.00	
	C_P [nF]	-	1.000	-	

図 10 に API 最大値が得られる、各種負帰還増幅回路のトランジスタの最適動作点を静特性上に示す。○印は 1 段目のトランジスタの動作点、△印は 2 段目のトランジスタの動作点を示すが、電圧-電流形及び電流-電圧形では、1 段目と 2 段目でソース端子とグランド間の接続形態は同一であり、 V_{GG1} と V_{GG2} は同一の値に設定されているため、1 段目のトランジスタと 2 段目のトランジスタ動作点は同一となっている。

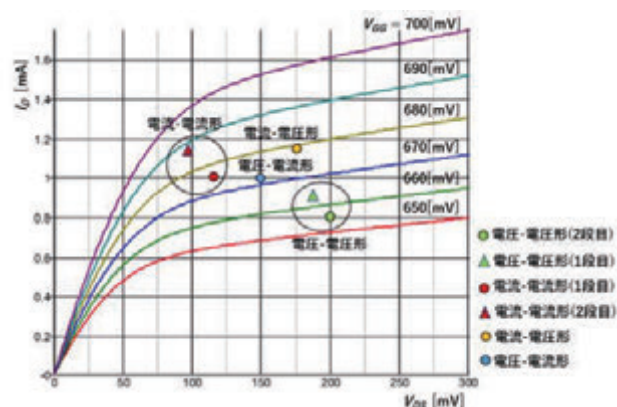


図 10 API 最大時の各種負帰還増幅回路の動作点

電圧-電圧形では、1 段目のソース端子とグランド間に R_E が挿入されており、2 段目はソース端子とグランドが直結されており、1 段目と 2 段目は構成が異なるため、各段ともほぼ同一のバイアス電流 I_D が得られるように各段の V_{GG} が別々に調整されている。この図より、API 最大値が得られる動作点の最適値は、 V_{DS} では 100[mV] から 200[mV]、 I_D では 0.8[mA] から 1.2[mA] の範囲にあり、電流-電流形では V_{DS} が小さく I_D が大きい傾向、電圧-電圧形では V_{DS} が大きく I_D が小さい傾向にあることが分かった。

4.2 電源電圧 V_{DD} に対する API の感度特性

各種負帰還増幅回路において、増幅部の回路パラメータ V_{DD} を API 最大値が得られる最適値から変動させたときの API 低下を表す感度特性について図 11 に示す。横軸は V_{DD} 最適値を基準として変動量を%で表し、プラスは V_{DD} の増加変動、マイナスは V_{DD} の減少変動を表している。また、×印は API が最大値から 10%低下する点を表しており、電流-電流形では+27%及び-12%、電流-電圧形では+28%及び-12%、電圧-電圧形では+23%及び-11%、電圧-電流形では+22%及び-13%となり、API の低下を 10%まで許すと V_{DD} 許容変動幅は 34%から 40%の間となり、どのタイプの帰還増幅回路も大差がないが、どのタイプもマイナス側はプラス側に比べて半分程度と許容変動幅が狭く、 V_{DD} を設定する場合はマイナス側にずれないように注意する必要があると言える。

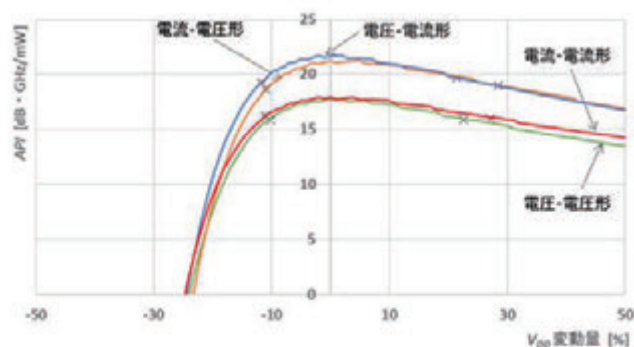


図 11 V_{DD} 変動に対する API の感度特性

API 低下の主要因を検討するため、図 12 に示すように電圧-電流形帰還増幅回路について API 最大値が得られる V_{DD} 最適値からの変動に対する利得 G , 3dB 帯域幅 B , 消費電力 W の感度特性を調べた。これより、 V_{DD} がプラス側に変動した場合は、 W のリニアな増加が G の増加を上回り、 B はわずかに減少するため API が低下することが分かった。 V_{DD} がマイナス側に変動した場合は、 W のリニアな低減、 B の緩やかな増加よりも G の急激な減少が上回るため、API が低下することが分かった。これは、 V_{DD} がマイナス側にずれると MOSFET の動作領域が飽和領域から非飽和領域へ移行することにより相互コンダクタンス g_m の大幅な低下をもたらす結果として V_{DD} 減少による大幅な利得低下が V_{DD} 減少による消費電力のリニアな低減を大きく上回ったためと考えられる。

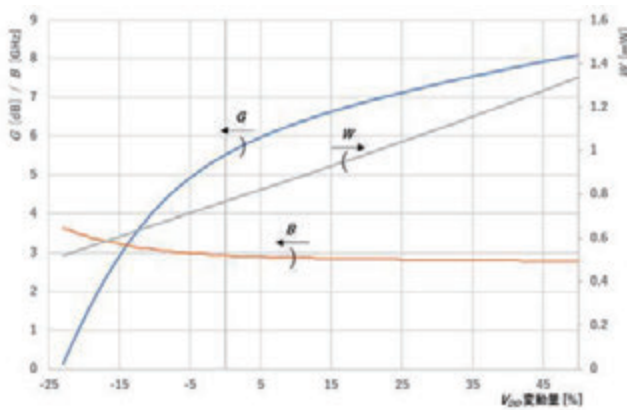


図 12 V_{DD} 変動に対する特性パラメータ G , B , W の感度特性

4.3 ゲート電圧 V_{GG} に対する API の感度特性

各種負帰還増幅回路において、増幅部の回路パラメータ V_{GG} を最適値から変動させたときの API 感度特性について図 13 に示す。×印は API が最大値から 10% 低下する点を表しており、電流-電流形と電圧-電流形では +2% 及び -3%、電流-電圧形と電圧-電圧形では +3% 及び -3% となり、API の低下を 10% まで許した V_{GG} 許容変動幅は 5%~6% と全ての回路パラメータの中で最も狭く、ゲート電圧 V_{GG} 変動の抑圧が回路性能の安定化の要であると言える。

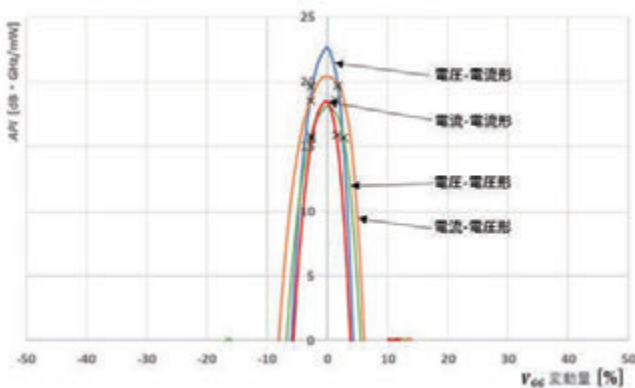


図 13 V_{GG} 変動に対する API の感度特性

API 低下の主要因を検討するため、図 14 に示すように電圧-電流形帰還増幅回路について API 最大値が得られる V_{GG} 最適値からの変動に対する利得 G , 3dB 帯域幅 B , 消費電力 W の感度特性を調べた。これより、 V_{GG} がプラス側に変

動した場合は、 G の急激な減少及び W のリニアな増加が B の緩やかな増加を上回るため API が低下することが分かった。 V_{GG} がマイナス側に変動した場合は、 G の急激な減少が W のリニアな低減、 B の微増を上回るため API が低下することが分かった。

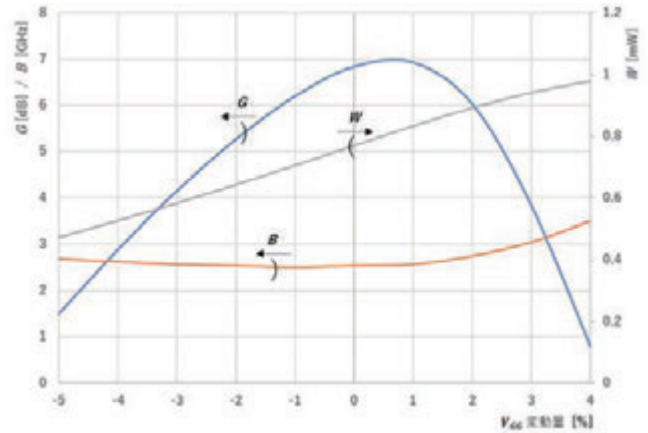


図 14 V_{GG} 変動に対する特性パラメータ G , B , W の感度特性

4.4 負荷抵抗 R_L に対する API の感度特性

各種負帰還増幅回路において、増幅部の回路パラメータ R_L を最適値から変動させたときの API 感度特性について図 15 に示す。×印は API が最大値から 10% 低下する点を表しており、電流-電流形では +18% 及び -21%、電流-電圧形では +34% 及び -31%、電圧-電圧形では +25% 及び -32%、電圧-電流形では +22% 及び -31% となり、API の低下を 10% まで許した V_{DD} 許容変動幅は、最も狭い電流-電流形では 39% であるが、他のタイプでは 50% を超えており、 R_L 変動の影響は増幅部回路パラメータの中では最も小さいと言える。

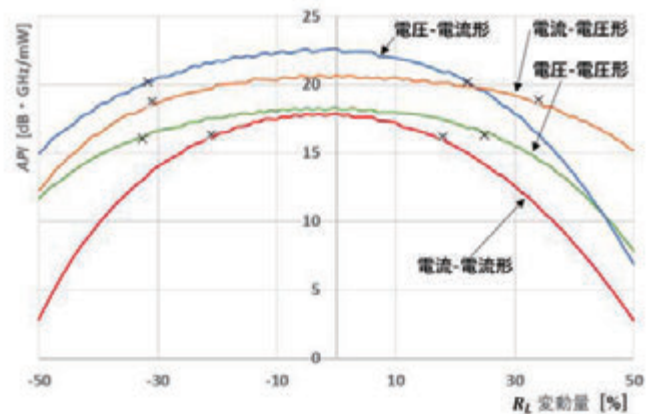


図 15 R_L 変動に対する API の感度特性

API 低下の主要因を検討するため、図 16 に示すように電圧-電流形帰還増幅回路について API 最大値が得られる R_L 最適値からの変動に対する利得 G , 3dB 帯域幅 B , 消費電力 W の感度特性を調べた。これより、 R_L がプラス側に変動した場合は、 W のリニアな低減や B の増加よりも G の減少がずっと大きいため API が低下することが分かった。 V_{GG} がマイナス側に変動した場合は、 W の直線的な増加と G の大幅な減少が B の緩やかな増加を上回るため API が低下することが分かった。

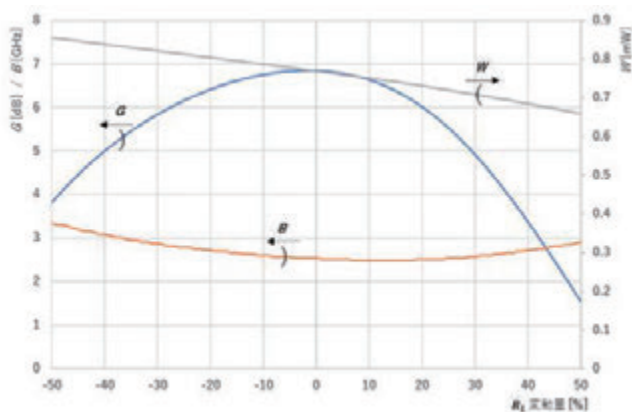


図 16 R_L 変動に対する特性パラメータ G, B, W の感度特性

4.5 帰還抵抗 R_F に対する API の感度特性

帰還部の回路パラメータ R_F を持つ電流-電流形, 電圧-電圧形, 電圧-電流形において, 回路パラメータ R_F を最適値から変動させたときの API 感度特性について図 17 に示す. 横軸は R_F 最適値を基準として変動量を%で表している. ×印は API が最大値から 10%低下する点を表しており, 電流-電流形, 電圧-電圧形では R_F を $\pm 50\%$ 変動させても API 低下は 5%未満であり, R_F 変動の影響は殆どないと言える. 電圧-電流形では API が最大値から 10%低下する R_F 許容変動量はマイナス側では-38%であるが, プラス側では+50%変動しても API の低下は 5.6%と R_F 変動の影響をあまり受けないことがわかった. 通常, 市販の抵抗値のばらつきは $\pm 10\%$ 以下であるので, R_F 変動による API の低下は考慮する必要のないレベルであると言える. なお, 解析結果が脈動して見えるのは, 該当の回路パラメータに対する API 変化が, 前述の回路パラメータよりずっと小さいと予測され, 解析時間低減のために解析ステップを粗くしたことが原因である.

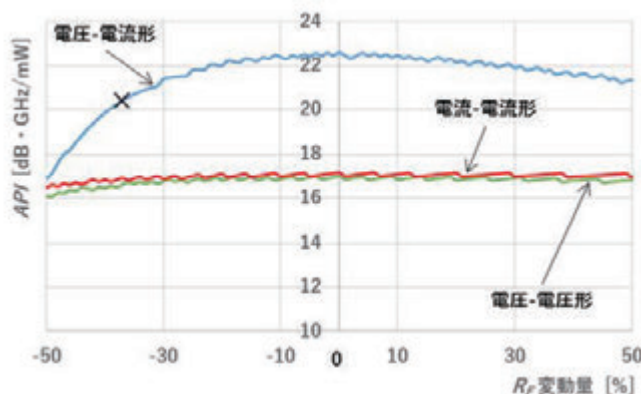


図 17 R_F 変動に対する API の感度特性

4.6 帰還インダクタ L_F に対する API の感度特性

帰還部の回路パラメータ L_F を持つ電流-電流形, 電圧-電圧形, 電圧-電流形において, L_F を最適値から変動させたときの API 感度特性について図 18 に示す. 横軸は L_F 最適値を基準とした変動量を%で表している. これら全てのタイプにおいて L_F を $\pm 50\%$ 変動させても API 低下は 5%未満であり, 同様に, L_F 変動による API の低下は考慮する必要のないレベルであると言える.

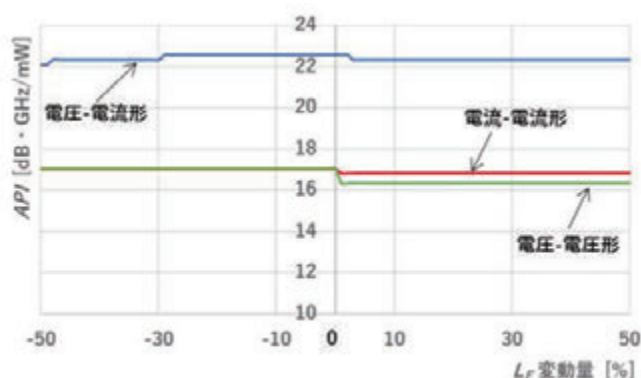


図 18 L_F 変動に対する API の感度特性

4.7 ピーキング抵抗 R_p に対する API の感度特性

帰還部の回路パラメータ R_p を持つ電流-電流形, 電圧-電圧形, 電流-電圧形において, R_p を最適値から変動させたときの API 感度特性について図 19 に示す. 横軸は R_p 最適値を基準とした変動量を%で表している. 電流-電圧形では R_p を $\pm 50\%$ 変動させても API の低下は 5%程度であり, 電流-電流形, 及び 電圧-電圧形においては 1%未満であり, 同様に, R_p 変動による API の低下は考慮する必要のないレベルであると言える. 解析結果の脈動は, 解析時間低減のため解析ステップを粗くしたことが原因である.

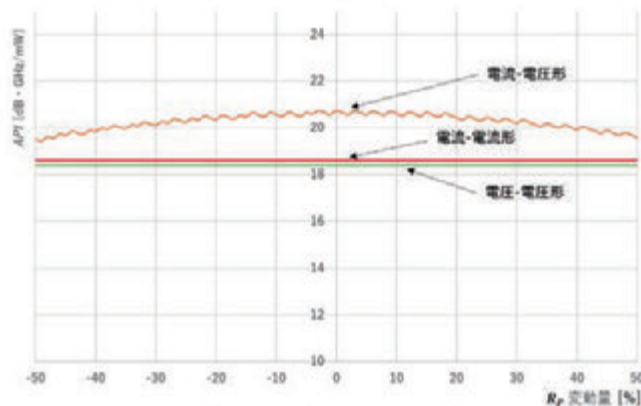


図 19 R_p 変動に対する API の感度特性

4.8 ピーキングコンデンサ C_p に対する API の感度特性

C_p を最適値から変動させたときの電流-電圧形の API 感度特性を図 20 に示す. 帰還部の回路パラメータ C_p は,

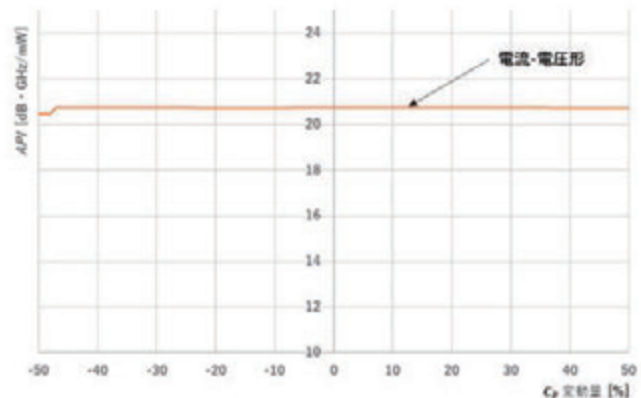


図 20 C_p 変動に対する API の感度特性

電流-電流形, 電流-電圧形, 電圧-電圧形に適用可能であるが, 電流-電圧形以外は帯域改善効果が殆ど見られなかったため, 電流-電圧形のみに適用した. 横軸は C_p 最適値を基準とした変動量を%で表している. C_p を $\pm 50\%$ 変動させても API の低下は 1%程度であり, 同様に, C_p 変動による API の低下は考慮する必要のないレベルであると言える.

5. むすび

デジタル受信機の主要要素である等化増幅部では, 広帯域, 高利得に加えて低消費電力な回路構成が求められている. これらの性能を最も引き出すことのできる増幅回路の構成を検討するため, 電圧-電流形, 電流-電圧形, 電圧-電圧形, 電流-電流形の負帰還増幅回路について, これらの 3 つの特性パラメータを一元的に評価することのできる性能指標 API を適用した. API は効率を表す性能指標であり, 各種負帰還増幅回路における最大値を求めるために増幅部および帰還部の回路パラメータを最適化した.

従来の API 最大値を求める回路シミュレーションでは, 一つの回路パラメータをマルチステップに変更し, 他の回路パラメータは全て固定していたが, 回路パラメータの変更とともにトランジスタの動作点がずれていくため, API 最大値となる回路パラメータ値を得るのに多大なシミュレーションの試行回数と時間を要した. 今回, 一つの回路パラメータをマルチステップに変更するとき, トランジスタの動作点が固定されるように, 関連する他のパラメータも同時に変更する動作点固定解析法を考案した. これにより, ある動作点での API 極大値を容易に求めることができるようになり, 動作点を変更し, 同様なマルチステップ解析を行うことにより, 各動作点での API 極大値を比較して最も大きな値である API 最大値を求めた. 動作点固定解析法により, 従来と比較して短時間で API 最大値が求められるようになったので, これを用いて, 広帯域化が期待できる電圧-電流形, 電流-電圧形, 電圧-電圧形, 電流-電流形の 4 つの負帰還増幅回路の API 最大値を求め, また, 各種回路パラメータが最適値からずれた場合の API の低下を表す感度特性について, 全ての回路パラメータについて検討を行った.

API 最大値は電圧-電流形が最も大きく, 次に電流-電圧形, さらに電流-電流形, 電圧-電圧形の順となり, 電圧-電流形は電圧-電圧形の約 1.3 倍の API 最大値が得られ, 主要因は広帯域特性であることが判明した.

電源電圧 V_{DD} に対する API の感度特性では, どのタイプの負帰還増幅回路においても, V_{DD} がマイナス側にずれた場合はプラス側にずれた場合よりも API 低下が大きく, プラス側と比較して API が 10%低下する V_{DD} の許容変動幅は半分であることが分かった. 主要因として V_{DD} がマイナス側にずれると MOSFET の動作領域が飽和領域から非飽和領域へ移行するため, 利得 G が急激に低下するためと考えられる.

ゲート電圧 V_{GG} に対する API の感度特性では, どのタイプの負帰還増幅回路においても V_{GG} の変動に敏感であり, 許容変動幅は 5%~6%と全ての回路パラメータの中で最も狭く, V_{GG} 変動の抑圧が回路特性の安定化の要であることが分かった.

負荷抵抗 R_L に対する API の感度特性では, どのタイプの負帰還増幅回路においても, 増幅部回路パラメータの中

では変動に対する API 低下は最も緩やかであることが分かった.

同様に, 帰還回路パラメータである, 帰還抵抗 R_F , 帰還インダクタ L_F , ピーキング抵抗 R_P , ピーキングコンデンサ C_P の影響はさらに小さく, 通常の精度の部品を用いる限り, API 低下の影響は無視できることが分かった.

以上より, 電圧-電流形, 電流-電圧形, 電圧-電圧形, 電流-電流形の負帰還増幅回路について, API による性能と各種回路パラメータの変動に対する感度特性について明らかにした.

参考文献

- [1] 高良秀彦, 大原拓也, 山本貴司, 山崎悦史, 犬塚史一, 高田篤, “マルチキャリア光発生技術および 1000 波長 WDM 伝送技術”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BCI-1-2, 2008.
- [2] Shigehiro Takasaka et al, “Increase of Cladding Pump Power Efficiency by a 19-Core Erbium Doped Fibre Amplifier”, ECOC2017, Th. 2, D, 2017.
- [3] D.Evans, CISCO White Paper, 2011.
- [4] 大川典男, “小信号電圧増幅回路の帯域利得特性・消費電力に関する性能指標”, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J92-C No. 7, 2009.
- [5] 大川典男, 竹内祐貴, 木島裕太, “性能指標 API 及び出力電圧振幅を考慮した増幅回路の最適動作点の検討”, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J93-C No. 10, 2010.
- [6] 廣田直弥, 大川典男, “MOSFET 増幅回路パラメータの自動抽出プログラムの応用”, 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 講演番号 145, 2016.